

Действительный член АН БССР С. И. ГУБКИН и С. И. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

### ИЗУЧЕНИЕ ИЗОХРОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ В ПРОЗРАЧНЫХ МОДЕЛЯХ, ПОЛУЧАЮЩИХ КОНЕЧНЫЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ

При просвечивании в поляризованном свете прозрачных моделей, получающих упругие деформации, наблюдаются изохромы, являющиеся совокупностью точек, в которых действуют равные касательные напряжения. Картина наблюдаемых изохром определяется видом нагружения, формой нагружаемого тела и инструмента. Авторы настоящей статьи отметили (<sup>1</sup>), что при нагружении прозрачных моделей, получающих конечные пластические деформации, наблюдаются изохромы, и высказали предположение, что эти изохромы также являются совокупностью точек, в которых действуют равные сдвигающие напряжения.

Для более достоверного подтверждения высказанного предположения полезно сравнить при одинаковом виде нагружения картину изохром, возникающую при упругой деформации модели, с картиной изохром, возникающей при конечных пластических деформациях модели той же формы. С этой целью были взяты четыре различных прозрачных материала, обнаруживающих оптическую чувствительность при нагружении изготовленных из них моделей. В зависимости от своего поведения при нагружении материалы были названы: упругий материал, упруго-пластичный, пластичный и весьма пластичный.

Упругий материал показывает картину изохром только до определенной степени упругого формоизменения. После достижения определенной степени упругого формоизменения картина изохром исчезает, и материал разрушается без следов пластической деформации. Упруго-пластичный материал, являющийся коллоидом, дает картину изохром как при малых, так и при весьма больших упругих деформациях. При сравнительно большой скорости нагружения этот материал деформируется только упруго. Однако в случае медленного воздействия сил, продолжающегося значительное время, материал после разгрузки показывает весьма значительные конечные деформации.

Весьма интересно, что картина изохром при переходе от упругих к конечным пластическим деформациям изменяется весьма мало и практически может быть принята одной и той же для формоизменения одной и той же величины, как упругого, так и пластического, вызванного продолжительностью внешнего воздействия.

В качестве пластичного материала было выбрано хлористое серебро, являющееся поликристаллом, упрочняющимся в процессе деформации и довольно хорошо отображающим поведение поликристаллических металлов. Весьма пластичным материалом, допускающим большие конечные деформации при отсутствии заметного упругого формоизменения, являлось

вещество аморфного строения, отличающееся большой способностью к релаксации.

После получения больших конечных деформаций и разгрузки цветная картина исчезает в течение малого времени, и состояние модели при ее просвечивании ничем не отличается от ее состояния перед нагружением. В то же время после разгрузки упруго-пластичного вещества, в случае, если оно претерпело конечные пластические деформации, остаточные эффекты имеют место. Еще в большей степени эти эффекты наблюдаются для хлористого серебра.

Для сравнительного испытания применялось нагружение при помощи вдавливания в плоскую модель плоского пуансона. Модель помещалась в стеклянный прозрачный контейнер, обеспечивающий плоское деформированное состояние. Полученные результаты представлены фотографиями, изображенными на рис. 1, 2, 3 и 4. Фотография, изображенная на рис. 1, подтверждает общеизвестное положение, что при принятом виде нагружения изохромы практически являются кругами, проходящими через края пуансона, если модель испытывает упругую деформацию. Совместное сопоставление приведенных фотографий позволяет сделать следующие выводы.

1. Независимо от природы материала и природы деформации, картины изохром во всех четырех случаях весьма схожи и в первом грубом приближении могут быть обобщены в виде картины кругов, проходящих через края пуансона.

2. Более близкую картину к обобщенной картине изохром дают упругие и упруго-пластичные материалы. Затем следует весьма пластичный материал, но в случае этого материала круги деформируются в явно выраженные эллипсы.

Еще более искаженную картину дает хлористое серебро, причем даже это искажение картины наблюдается только на первых стадиях конечной пластической деформации при непременном условии весьма мелкого зерна. В случае более крупного зерна изохромы исчезают и уступают место разноцветной окраске отдельных зерен (рис. 3 б), что свидетельствует об отсутствии строгой упорядоченности в распределении напряженного состояния.

Напрашивается следующее объяснение наблюдаемому явлению. Работа, затрачиваемая на деформацию, в общем случае может быть в первом приближении разделена на две части: на работу, идущую на пластическую деформацию тела и превращающуюся в тепло, и на работу, превращающуюся в потенциальную энергию деформируемого тела. Получаемая в результате деформации потенциальная энергия в свою очередь разделяется на потенциальную энергию остаточных напряжений и на потенциальную энергию, обеспечивающую создание внутренних сил, уравнивающих силы внешние. Эту часть потенциальной энергии можно назвать уравнивающей энергией или потенциальной энергией уравнивающих напряжений. При разгрузке тела уравнивающие напряжения и связанные с ними упругие деформации тела снимаются, тело освобождается от указанной части энергии, так как она идет на возвращение атомов к местам их устойчивого равновесия. Потенциальная энергия остаточных напряжений остается в теле после его разгрузки.

Работа деформации, превращаемая в потенциальную энергию, в общем случае при наличии упрочнения доходит до 20% от всей затраченной работы на деформацию, при этом потенциальная энергия остаточных напряжений может в 3—4 и даже 5 раз превышать потенциальную энергию уравнивающих напряжений. В свою очередь остаточные напряжения разделяются на остаточные напряжения первого, второго и третьего рода. Весьма важно, что энергия остаточных напряжений первого рода составляет не больше 1% всей затраченной работы на дефор-

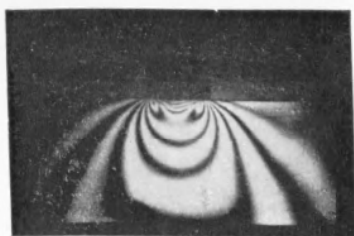
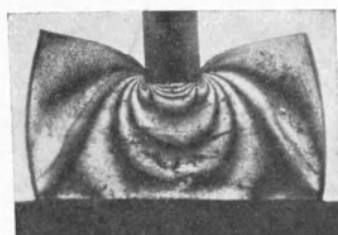
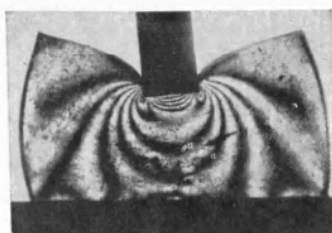


Рис. 1. Изохромы, наблюдаемые при упругой деформации вполне упругого материала

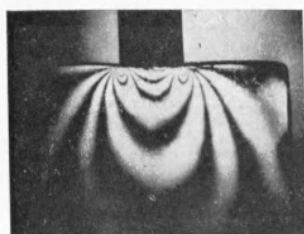


*a*

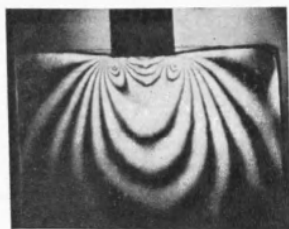


*б*

Рис. 2. Изохромы, наблюдаемые при упругой деформации упруго-пластического материала (коллоид): *a* — меньшая степень деформации, *б* — большая степень деформации

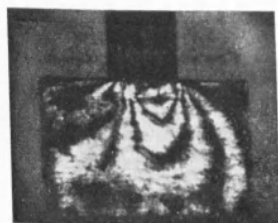


*a*



*б*

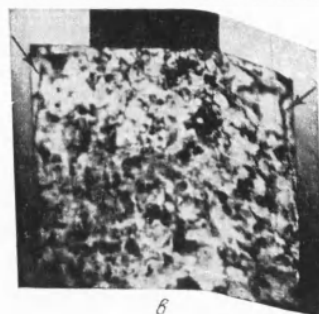
Рис. 3. Изохромы, наблюдаемые при конечной деформации весьма пластичного аморфного материала: *a* — меньшая степень деформации, *б* — большая степень деформации



*a*



*б*



*в*

Рис. 4. Изохромы, наблюдаемые при конечной пластической деформации пластичного поликристаллического материала: *a* — меньшая степень деформации (исходная структура мелкозернистая), *б* — большая степень деформации (исходная структура мелкозернистая), *в* — отсутствие изохран (исходная структура крупнозернистая)

мацию и таким образом, в общем случае, значительно ниже, чем энергия остаточных напряжений второго и третьего рода и чем энергия уравнивающих напряжений.

В рассматриваемом нами случае только хлористое серебро способно к образованию остаточных напряжений всех трех родов. Аморфный материал в силу своего строения, по нашему мнению, дает возможность образования при пластической деформации только остаточных напряжений первого рода. Упруго-пластичный коллоид также допускает возможность образования остаточных напряжений, главным образом, первого рода.

Это обстоятельство и отражается на картине изохром, если принять, что уравнивающие напряжения как при упругой, так и при пластической деформации распределяются по законам упругости, а распределение остаточных напряжений первого рода подчиняется условию: остаточные напряжения первого рода, складываясь с уравнивающими напряжениями в каждой точке деформируемого тела, образуют рабочие напряжения, которые распределяются в пластически деформируемом теле по законам пластичности.

Остаточные напряжения второго и третьего рода распределяются в деформируемом объеме в зависимости от индивидуальных свойств отдельных кристаллитов и тем самым нарушают порядок распределения рабочих напряжений в соответствии с законами пластичности. Создается впечатление неупорядоченного распределения рабочих напряжений, зависящего от индивидуальных свойств отдельных кристаллитов. В известной степени эта неупорядоченность только кажущаяся, так как распределение остаточных напряжений второго и третьего рода только затушевывает закономерную картину распределения рабочих напряжений и наблюдаемая неупорядоченность подчинена определенным условиям. Однако с искажением распределения рабочих напряжений, вызванным остаточными напряжениями второго и третьего рода, необходимо серьезно считаться.

Возвращаясь к нашим экспериментам, мы видим, что они полностью подтверждают высказанное положение. Повидимому, различие в форме изохром упругого, упруго-пластичного и весьма пластичного материалов следует приписать прежде всего влиянию остаточных напряжений, которые различны для упруго-пластичного и весьма пластичного материала. Главное влияние при этом оказывают остаточные напряжения первого рода, причём для весьма пластичного материала можно считаться только с этими напряжениями.

В случае хлористого серебра к влиянию остаточных напряжений первого рода присоединяется еще сильно искажающее картину распределения напряжений влияние остаточных напряжений второго и третьего рода. При мелком зерне и сравнительно небольших конечных деформациях это искажающее влияние хотя и имеется, но закономерная картина распределения напряжений еще сохраняется. С увеличением степени деформации или с увеличением величины зерна и его разнородности по величине видимая картина закономерного распределения напряжений нарушается и сменяется кажущимся неупорядоченным распределением напряжений, зависящим от индивидуальных свойств отдельных кристаллитов.

В данной статье описаны результаты, полученные при внедрении плоского пуансона в деформируемое тело. Такие же результаты получены при плоском осаживании и при истечении из контейнера тех же материалов.

Если бы остаточные напряжения второго и третьего рода в процессе пластической деформации снимались, то для такого состояния кристаллических тел неупорядоченное распределение рабочих напряжений, указанное выше, должно отсутствовать и должна наблюдаться картина изо-

хром, отвечающая распределению напряжений по законам пластичности. Такая картина должна наблюдаться также всегда и при конечных пластических деформациях весьма пластичных аморфных тел и вообще тел, в которых могут возникать только остаточные напряжения первого рода.

Если бы в процессе самой пластической деформации снимались не только остаточные напряжения второго и третьего рода, но и остаточные напряжения первого рода, то распределение напряжений должно было бы приближаться к распределению напряжений при упругой деформации. Весьма возможно, что при очень высоких температурах пластической деформации поликристаллических металлов мы и имеем в действительности такое приближение.

Настоящее исследование показывает, что для составления представления о характере распределения напряжений в поликристаллических металлах при их пластической деформации следует пользоваться прозрачными моделями аморфных, весьма пластичных тел, которые при их пластической деформации показывают упорядоченное распределение напряжений, отвечающее законам пластичности. В некоторых случаях полезно также прибегать к исследованию распределения напряжений в упруго-пластических материалах, допускающих значительные упругие деформации. Такие исследования могут дать нужный ориентирующий материал.

Поступило  
25 XI 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. И. Губкин, С. И. Добровольский, ДАН, 73, № 1 (1950).